

Б.І. Приймак, канд. техн. наук (Каталонський політехнічний ун-т, Барселона)

ЗАКОНИ ОПТИМІЗАЦІЇ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ

Розглядається тема побудови енергоощадних асинхронних електроприводів. Отримано закони керування потокозчепленням ротора та швидкістю ковзання асинхронного двигуна, що мінімізують сумарні втрати потужності в ustalених режимах роботи. Чисельним способом оцінено якість запропонованих законів оптимізації втрат.

Рассматривается тема построения энергосберегающих асинхронных электроприводов. Получены законы управления потокозцеплением ротора и скоростью скольжения асинхронного двигателя, что минимизируют суммарные потери мощности в установившихся режимах работы. Численным способом оценено качество предложенных законов оптимизации потерь.

1. ВСТУП

При побудові енергоощадних асинхронних електроприводів (АЕП) значного застосування набуває метод аналітичної оптимізації втрат потужності, де оптимальне значення магнітного потоку визначається за виразом, отриманим на основі дослідження на екстремум моделі втрат потужності. Істотною перевагою такого способу мінімізації втрат в асинхронному двигуні (АД) є простота практичної реалізації енергоощадного керування. Суттєвим недоліком тут є неврахування нелінійності кривої намагнічування двигуна, що зменшує точність мінімізації втрат.

На сьогодні відома низка праць за темою оптимізації втрат потужності в АД для ustalених режимів роботи шляхом пошуку аналітичного розв'язку. Зокрема у праці [10] розглядалася задача мінімізації струму статора, в [1] та [6] ставилося за мету мінімізувати втрати у міді двигуна, в [7-9] розглядалася задача оптимізації втрат у міді та залізі АД. В [2, 3] було розширено у порівнянні з цитованими працями модель втрат в АД та отримано аналітичний розв'язок задачі оптимізації за критерієм мінімуму сумарних втрат потужності. Також там було проведено дослідження впливу насичування магнітопроводу двигуна.

У даній статті розвиваються питання побудови енергоощадних АЕП. Отримано нові аналітичні вирази для визначення енергетично оптимальних потоку ротора та швидкості ковзання АД. Модифіковано закон оптимізації втрат для можливості його функціонування за сигналами моментної компоненти та модуля вектора струму статора. Чисельним способом оцінено точність визначення оптимального потоку та очікуваний ефект від застосування запропонованих законів мінімізації втрат.

У статті для розрахунків використовувалися типові 4-х полюсні короткозамкнені АД потужністю 1,5 кВт та 30 кВт, які нижче називатимемо двигунами D1 та D2 відповідно.

2. ОПИС ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ

У зорієнтованій за узагальненим вектором потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r$ рухомій системі координат (d, q) математичний опис ідеалізованого АД матиме вигляд наступної системи диференціальних рівнянь [4]:

$$\begin{aligned}
d\Psi_r/dt &= -\Psi_r/T_r + I_d L_m/T_r \\
dI_d/dt &= -I_d/T_s + U_d/L'_s + (\omega_0 L'_s I_q + K_r \Psi_r/T_r)/L'_s \\
dI_q/dt &= -I_q/T_s + U_q/L'_s - (\omega_0 L'_s I_d + K_r \Psi_r z_p \omega)/L'_s \\
d\omega/dt &= (M_E - M_H)/J,
\end{aligned} \tag{1}$$

де $\Psi_r = |\overline{\Psi}_r|$ – модуль вектора потокозчеплення ротора АД, I_d, I_q – відповідно потокова та моментна компоненти вектора струму статора \overline{I}_s , ω – кутова швидкість обертання ротора двигуна; U_d, U_q – компоненти вектора напруги статора \overline{U}_s ; ω_0 – кутова швидкість обертання магнітного поля ротора; M_E, M_H – відповідно електромагнітний момент та момент навантаження двигуна; z_p – число пар полюсів; J – сумарний момент інерції привода; $T_s = L'_s/R'_s, T_r = L_r/R_r$ – сталі часу; R_s, R_r – активні опори фаз статора та ротора відповідно; $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ – індуктивності від полів розсіювання; L_m – взаємна індуктивність між статором та ротором; $L_r = L_m + L_{r\sigma}$ – повна індуктивність фази ротора; $L'_s = L_{s\sigma} + K_r L_{r\sigma}; R'_s = R_s + K_r^2 R_r; K_r = L_m/L_r; K_M = 3z_p K_r/2$. В (1) електромагнітний момент двигуна дорівнює

$$M_E = K_M \Psi_r I_q, \tag{2}$$

а кутова швидкість обертання $\overline{\Psi}_r$ визначається як $\omega_0 = z_p \omega + \omega_s$, де ω_s – кутова швидкість ковзання АД, що дорівнює

$$\omega_s = K_r R_r I_q / \Psi_r. \tag{3}$$

На етапі аналітичних досліджень ми вважатимемо магнітозалежні параметри опису (1) сталими, тобто розглядатимемо магнітне коло АМ як лінійне. Слід зазначити, що припущення $L_m = \text{const}$ є вимушеним при отриманні аналітичного розв'язку задачі оптимізації втрат, оскільки в протилежному разі такого розв'язку не існує. При цьому в отриманих нижче законах оптимізації мається на увазі використання $L_m = L_{mn}$, де L_{mn} – значення взаємної індуктивності у номінальному режимі роботи АД (індексом “n” в статті позначатимуться номінальні значення величин). Що стосується врахування $L_m = \text{var}$ через насичування осердя статора, то це зробимо у 4-му розділі чисельним способом.

Серед втрат потужності в АД виділяють електричні втрати в обмотці статора; електричні втрати у роторі; магнітні втрати в осерді статора; магнітні втрати у роторі; додаткові втрати; механічні втрати. Запишемо підсумкові вирази для втрат потужності на основі [2], де вони розглянуті детальніше. Електричні втрати або втрати у міді двигуна визначатимуться як

$$P_{cu} = P_s + P_r, \tag{4}$$

де $P_s = 1,5(I_d^2 + I_q^2)R_s$ – втрати в обмотці статора; $P_r = 1,5I_q^2 K_r^2 R_r$ – втрати у роторі. Магнітні втрати у статорі та роторі, або втрати у залізі АД часто обчислюють за виразом

$$P_{fe} = 1,5 \left[\Psi_m^2 \left(K_h (|\omega_0| + |\omega_s|) + K_e (\omega_0^2 + \omega_s^2) \right) \right] \quad (5)$$

де $\Psi_m = |\bar{\Psi}_m|$; $\bar{\Psi}_m$ – вектор потокозчеплення у повітряному проміжку двигуна; K_h – коефіцієнт втрат від гістерезису; K_e – коефіцієнт втрат від вихрових струмів. Для додаткових втрат можна використовувати опис у вигляді

$$P_a = 1,5 K_a \omega^2 K_r^2 I_q^2, \quad (6)$$

де K_a – коефіцієнт додаткових втрат в АМ. Механічні втрати на валу двигуна у спрощеному вигляді, при врахуванні лише втрат від в'язкого тертя, дорівнюватимуть

$$P_\omega = K_\omega \omega^2 \quad (7)$$

де K_ω – коефіцієнт механічних втрат. Для сумарних втрат потужності у двигуні дістанемо

$$P_\Sigma = P_{cu} + P_{fe} + P_a + P_\omega, \quad (8)$$

де складники визначаються за (4)-(7).

В [3] шляхом аналітичного розв'язання рівняння $dP_\Sigma/d\Psi_r = 0$ при $M_E = const$,

$\omega = const$ отримано енергетично оптимальне значення Ψ_r^o модуля вектора потокозчеплення ротора АД, що обчислюється за виразом

$$\Psi_r^o = \frac{1}{6} \sqrt{3\sqrt{6} A + 3 \sqrt{-\frac{1}{a} \left(48b + 6B + C(288ad + 24b^2) + 72\sqrt{6} \frac{c}{A} \right)}}, \quad M_E \neq 0, \quad (9)$$

де

$$\begin{aligned} A &= \sqrt{(B + C(48ad + 4b^2) - 4b)/a}; \quad B = D^{1/3}; \quad C = D^{-1/3}; \\ D &= 108ac^2 - 288abd + 8b^3 + \\ &\quad 12a\sqrt{3(128ab^2d^2 - 256a^2d^3 - 16b^4d - 144abc^2d + 27ac^4 + 4b^3c^2)/a}; \\ a &= R_s/L_m^2 + K_h z_p |\omega| + K_e (z_p \omega)^2; \\ b &= -(M_E/K_M)^2 (R_s + K_r^2 (R_r + K_a \omega^2 + 2K_e R_r^2 + L_{r\sigma}^2 (K_h z_p |\omega| + K_e (z_p \omega)^2))) \\ c &= -R_r L_{r\sigma}^2 ((2K_h + 4K_e z_p |\omega|) \text{sign}(\omega) + 2K_h \text{sign}(M_E)) \times (K_r M_E/K_M)^3; \\ d &= -6K_e (L_{r\sigma} R_r)^2 (K_r M_E/K_M)^4. \end{aligned}$$

Вираз (9) ми використаємо нижче при чисельних дослідженнях.

3. ЗАКОНИ КЕРУВАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ВТРАТ

Модель втрат (8) і, відповідно, вираз (9) отримані на основі математичного опису ідеалізованого двигуна. У даному розділі для отримання закону керування потоком візьмемо

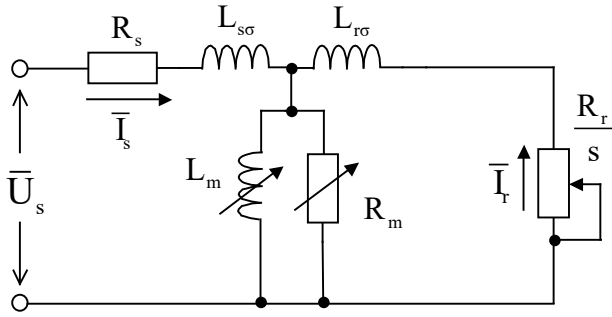


Рис.1

за основу модель втрат потужності для класичної Т-подібної схеми заміщення АД, що зображена на рис.1. На цьому рисунку \bar{I}_r – вектор струму ротора; R_m – магнітний опір; $s = (\omega_0 - z_p \omega) / \omega_0$ – ковзання двигуна. Для даної схеми заміщення в [2] отримано у зорієнтованих за $\bar{\Psi}_r$ координатах опис втрат потужності в двигуні $P_{\Sigma T} = P_{\Sigma T}(I_d, I_q, \omega)$ у вигляді

$$P_{\Sigma T} = \frac{3}{2} \left\{ \left[R_s \left(1 + \frac{\omega_0^2 K_r^2 L_{rs}^2}{R_m^2} \right) + \frac{\omega_0^2 K_r^2 L_{rs}^2}{R_m} + K_r^2 (R_r + K_a \omega^2) \right] I_q^2 + \left[R_s \left(1 + \frac{\omega_0^2 L_m^2}{R_m^2} \right) + \frac{\omega_0^2 L_m^2}{R_m} \right] I_d^2 + 2 R_s K_r L_m I_d I_q \frac{\omega_0}{R_m} \right\} + K_\omega \omega^2. \quad (10)$$

На основі (10), використовуючи отримані для усталених процесів із 1-го рівняння системи (1) та із (2) співвідношення $I_d = \Psi_r / L_m$, $I_q = M_E / (K_M \Psi_r)$, дістанемо опис втрат $P_{\Sigma T} = P_{\Sigma T}(\Psi_r, M_E, \omega)$ як

$$P_{\Sigma T} = \frac{3}{2} \left\{ \left[R_s \left(1 + \frac{\omega_0^2 K_r^2 L_{rs}^2}{R_m^2} \right) + \frac{\omega_0^2 K_r^2 L_{rs}^2}{R_m} + K_r^2 (R_r + K_a \omega^2) \right] \frac{M_E^2}{K_M^2 \Psi_r^2} + \left[R_s \left(L_m^{-2} + \frac{\omega_0^2}{R_m^2} \right) + \frac{\omega_0^2}{R_m} \right] \Psi_r^2 + R_s \frac{4 M_E \omega_0}{3 z_p R_m} \right\} + K_\omega \omega^2. \quad (11)$$

При еквівалентності втрат у залізі опису (5), магнітний опір в (11) визначатиметься як

$$R_m = \left(K_h (1 + |s|) / |\omega_0| + K_e (1 + s^2) \right)^{-1}. \quad (12)$$

Зважаючи на те, що при суттєвих втратах у залізі, коли власне і їх роль в механізмі оптимізації є істотною, буде справджуватися $|\omega_s| \ll |\omega_0|$, прийнемо $\omega_0 \cong z_p \omega$. В цьому разі із (12) дістанемо

$$R_m \cong \left(K_h / |z_p \omega| + K_e \right)^{-1}. \quad (13)$$

Тепер розв'язавши рівняння $dP_{\Sigma T} / d\Psi_r = 0$ при $M_E = const$, $\omega = const$, отримаємо оптимальне значення модуля вектора потокозчеплення ротора

$$\Psi_r^o \cong \sqrt{|M_E|} \sqrt{\frac{1}{K_M} \sqrt{\frac{R_s + (z_p \omega)^2 K_r^2 L_{r\sigma}^2 (R_s + R_m) R_m^{-2} + K_r^2 (R_r + K_a \omega^2)}{R_s / L_m^2 + (z_p \omega)^2 (R_s + R_m) / R_m^2}}}. \quad (14)$$

У виразі (14) можна зробити два спрощення. По-перше, тут можна знехтувати 2-м членом у чисельнику підкореневого дробу. Щоб оцінити реальні значення відношення q/p , де $q = (z_p \omega)^2 K_r^2 L_{r\sigma}^2 (R_s + R_m) R_m^{-2}$; $p = R_s + K_r^2 (R_r + K_a \omega^2)$, були зроблені розрахунки для двигунів D1 та D2 при трьох значеннях швидкості $\omega = \omega_n; 3\omega_n; 5\omega_n$, де опір R_m визначався за (13). У результаті для D1 відповідно отримано $q/p = 0,003; 0,013; 0,021$, а для D2 – $q/p = 0,007; 0,025; 0,034$. Отже бачимо, що q/p зростає при збільшенні швидкості двигуна. Проте навіть при швидкості, яка у 5 разів більша від номінальної, частка q у p не перевищує 2,2% для D1 та 3,5% для D2, а значить співвідношення $q \ll p$ є обґрунтованим. По-друге, зважаючи на істотно різновеликі значення опорів R_s та R_m , можна прийняти $R_s + R_m \cong R_m$. Зробивши в (14) зазначені спрощення, дістанемо

$$\Psi_r^o \cong \sqrt{|M_E|} \sqrt{\frac{1}{K_M} \sqrt{\frac{R_s + K_r^2 (R_r + K_a \omega^2)}{R_s / L_m^2 + (z_p \omega)^2 / R_m(\omega)}}}. \quad (15)$$

Отже ми отримали вираз (15), що дає нам алгоритм або закон керування потоком для оптимізації втрат в АД. Бачимо, що цей вираз є досить компактным, а значить і добре придатним для мікропроцесорної реалізації. Тут використовується залежність $R_m(\omega)$, яка може бути отримана на основі експериментально визначених втрат у залізі для ряду частот живлення двигуна. В мікропроцесорних АЕП при обчисленні Ψ_r^o в реальному часі для спрощення доцільно використовувати кусочно-лінійну апроксимацію кривої $R_m(\omega)$.

Закон (15) пов'язує Ψ_r^o із змінними M_E та ω , які є незалежними від Ψ_r . Доцільно отримати модифікації цього закону де замість M_E будуть використовуватися залежні від потоку змінні, зокрема моментна компонента та модуль вектора струму статора. У підсумку це дозволить вибрати найбільш раціональний варіант з точки зору простоти застосування.

Згідно з (2) $I_q = M_E / (K_M \Psi_r)$. Враховуючи це із (15) матимемо

$$\Psi_r^o \cong |I_q| \sqrt{\frac{R_s + K_r^2 (R_r + K_a \omega^2)}{R_s / L_m^2 + (z_p \omega)^2 / R_m(\omega)}}. \quad (16)$$

Для усталених процесів із 1-го рівняння системи (1) матимемо рівність $I_d = \Psi_r / L_m$, а значить буде вірним співвідношення $I_q^2 = I_s^2 - \Psi_r^2 / L_m^2$, де $I_s = |\bar{I}_s|$. Враховуючи це із (16) дістанемо

$$\Psi_r^o \cong I_s \sqrt{\frac{R_s + K_r^2 (R_r + K_a \omega^2)}{2R_s/L_m^2 + (R_r + K_a \omega^2)/L_r^2 + (z_p \omega)^2/R_m(\omega)}}. \quad (17)$$

Порівнюючи (15)-(17) бачимо, що найпростішим в обчислювальному відношенні є вираз (16). Другою перевагою тут є те, що змінна I_q у векторно-керованих АЕП завжди є в відомою на протигагу змінній M_E , яку зазвичай потрібно окремо оцінювати чи вимірювати. Варіант (17) особливий тим, що для визначення I_s достатньо лише вимірювати струми двох фаз АД, а координатні перетворення векторів не є необхідними.

Закони (15)-(17) орієнтовані на застосування в системах векторного керування АД, де здійснюється безпосереднє регулювання Ψ_r . Поряд з цим існують простіші системи, зокрема системи частотно-струмового керування АД, де бажане значення потоку підтримується опосередковано через формування відповідної швидкості ковзання ω_s . Визначимо швидкість ковзання ω_s^o , що відповідатиме Ψ_r^o . Із (2) та (3) маємо

$$\omega_s = 2R_r M_E / 3z_p \Psi_r^2. \quad (18)$$

Тепер із (15) при врахуванні (18) дістанемо

$$\omega_s^o \cong \pm R_r K_r \sqrt{\frac{R_s/L_m^2 + (z_p \omega)^2/R_m(\omega)}{R_s + K_r^2 (R_r + K_a \omega^2)}}. \quad (19)$$

Отриманий вираз засвідчує, що для мінімізації втрат в АД швидкість ковзання має бути постійною незалежно від навантаження двигуна та вона має змінюватися залежно від ω .

Варто зазначити, що закон (19) для формування ω_s є досконалішим від отриманого в [10] аналогу. Це пояснюється тим, що в [10] використано критерій мінімуму струму статора АД або, що те саме, мінімуму омичних втрат у статорі. А в застосованому нами критерії оптимальності втрати охопленні істотно повніше. Тому оптимізація за (19) буде ліпшою.

Вище бралися до уваги втрати потужності лише у двигуні. Згідно з [5], в АЕП потужністю до 10 кВт втрати у двигуні істотно більші ніж у силовому перетворювачі (СП), що живить цей АД. Проте приблизно при 100 кВт втрати в АД та СП вже є співмірними. Кондуктивна складова втрат у інверторі є пропорційною квадрату струму статора та внутрішньому опору інвертора і може бути легко врахована в отриманих вище законах керування. До втрат в АЕП належать також омичні втрати у силовому кабелі, що з'єднує двигун з його джерелом живлення. В деяких практичних застосуваннях електроприводів виникає потреба у віддаленні двигуна на значну відстань. Це збільшує втрати у кабелі і вони можуть бути взяті до уваги при оптимізації. Отже, щоб поряд із втратами в АД врахувати також кондуктивні втрати в інверторі та втрати у силовому кабелі, в законах (15)-(17) та (19) слід замінити R_s на R_Σ , де $R_\Sigma = R_s + R_{inv} + R_{cab}$; R_{inv} – опір фази інвертора; R_{cab} – опір фази силового кабелю.

4. ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

У цьому розділі чисельним способом оцінимо якість запропонованих вище законів оптимізації втрат потужності. Дослідження здійснюватимемо на множині значень моменту та швидкості $\Omega(M_E, \omega)$, що дорівнює $\Omega = \{M_E \in [0,03, 1,0]M_{En}; \omega \in [0,01, 3,0]\omega_n\}$. На першому етапі досліджень для виявлення сукупного впливу зроблених при отриманні (15) спрощень, оцінимо помилку визначення оптимального потоку. Цю помилку означимо як $\Delta\Psi_r = \Psi_{r1}^o - \Psi_{r2}^o$, де Ψ_{r1}^o визначається за (15) та (13), а Ψ_{r2}^o визначається за (9). Зробивши розрахунки на множині Ω , були отримані залежності $\Delta\Psi_r(M_E, \omega)$ для двигунів D1 та D2, які у відносних одиницях (в. о.) представлені відповідно на рис.2,3. При

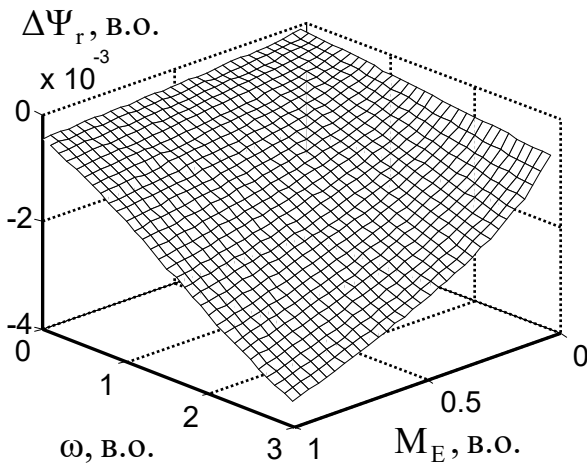


Рис. 2

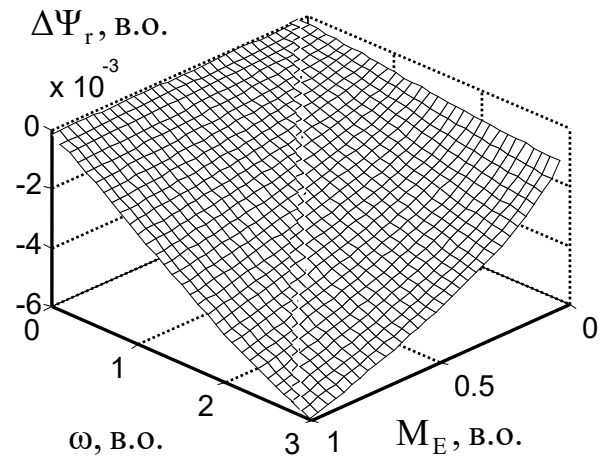


Рис. 3

нормуванні для M_E та ω базовими узяті їх номінальні значення, а для $\Delta\Psi_r$ базовим є номінальне значення модуля вектора потокозчеплення ротора Ψ_{rn} . Аналізуючи зображені на рис.2,3 поверхні бачимо, що абсолютне значення помилки зростає при збільшенні швидкості та моменту АД і не перевищує 0,4% для D1 та 0,6% для D2. Щоб виявити вплив на втрати потужності таких $\Delta\Psi_r$, на множині Ω було визначено екстремуми різниці втрат як $\max\{P_{\Sigma T}(\Psi_{r1}^o, M_E, \omega) - P_{\Sigma T}(\Psi_{r2}^o, M_E, \omega)\}$, де $P_{\Sigma T}$ визначається за (11) та (12). Ці максимальні значення виявилися дуже малими, вони дорівнюють 0,02 Вт та 0,53 Вт для двигунів D1 та D2 відповідно. Отже на основі отриманих результатів можна зазначити, що точність визначення Ψ_r^o за (15) у порівнянні з (9) є достатньо доброю.

На другому етапі досліджень взято за мету оцінити очікуваний ефект від застосування отриманих вище законів оптимізації втрат. Для обчислення втрат потужності тут використовується модель (11), де $\omega_0 = z_p \omega + 2R_r M_E / 3z_p \Psi_r^2$, а R_m визначається за (12). Для врахування в (11) насичування магнітопровода по головному магнітному шляху застосовується отримана на основі характеристики намагнічування двигуна залежність

$L_m(\Psi_m)$ у вигляді поліному $L_m = L_{mn} \sum_{i=0}^p a_i \Psi_m^{p-i}$, де $\Psi_m = \sqrt{\Psi_r^2 + 4L_{r\sigma}^2 M_E^2 / 9z_p^2 \Psi_r^2}$; a_i ,

p – відповідно коефіцієнти та степінь поліному. При цьому в (11) коефіцієнт $K_r = L_m(\Psi_m) / (L_m(\Psi_m) + L_{r\sigma})$, а індуктивність розсіювання $L_{r\sigma} = const$.

У цьому дослідженні порівнюються втрати потужності в АД для усталених процесів його роботи на множині значень моменту та швидкості Ω при двох варіантах закону керування потоком ротора. Перший варіант полягає у традиційному керуванні $\Psi_r = \Psi_r^{stb} = \min\{\Psi_{rn}, \Psi_{rn} \omega_n / |\omega|\}$. Втрати потужності в цьому випадку обчислюються як $P_{\Sigma T}^{stb} = P_{\Sigma T}(\Psi_r^{stb}, M_E, \omega)$. Другий варіант полягає у енергоощадному керуванні $\Psi_r = \Psi_r^{opt} = \min\{\Psi_r^o, \Psi_{rn}, \Psi_{rn} \omega_n / |\omega|\}$, де Ψ_r^o визначається за (15) при $L_m = L_{mn}$ та розрахунку R_m за (13). Втрати тут обчислюються як $P_{\Sigma T}^{opt} = P_{\Sigma T}(\Psi_r^{opt}, M_E, \omega)$. Після обчислення втрат для порівнюваних законів керування потоком визначався ефект як різниця втрат потужності ΔP , що дорівнює $\Delta P = P_{\Sigma T}^{stb} - P_{\Sigma T}^{opt}$. Отримані таким чином залежності $\Delta P(M_E, \omega)$ для двигунів D1 та D2 у нормованому вигляді зображені відповідно на рис.4,5, де за базове значення для ΔP взято номінальні втрати потужності у двигуні.

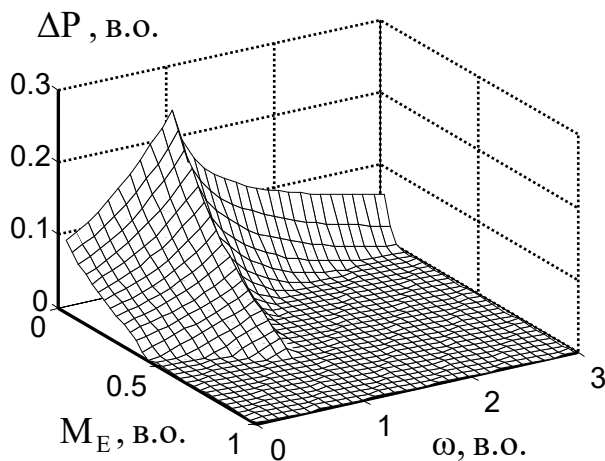


Рис. 4

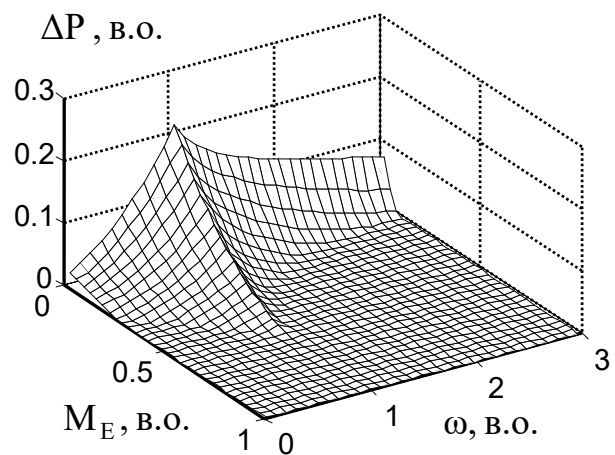


Рис. 5

Аналізуючи представлені на рис.4,5 поверхні можна зазначити, що очікуваний ефект від застосування закону оптимізації втрат (15), а також і еквівалентних йому у межах справедливості теорії ідеалізованої асинхронної машини законів (16), (17) та (19), є істотним. Зменшення втрат ΔP при малих навантаженнях у зоні близьких до ω_n швидкостей може сягати 20-25% від номінальних втрат потужності.

5. ПІДСУМКИ

Виходячи із опису втрат потужності в АД на основі Т-подібної схеми заміщення, отримано закон керування модулем вектора потокозчеплення ротора для оптимізації сумарних втрат потужності в усталених режимах роботи. Запропоновано дві модифікації цього закону, що функціонують в залежності від моментної компоненти та модуля вектора струму статора. Отримано закон формування швидкості ковзання АД для мінімізації втрат потужності, що має своїм призначенням клас простіших АЕП ніж векторно-керовані. Проведені чисельні дослідження показали, що завдяки застосуванню запропонованих законів оптимізації втрат можна мати істотний ефект.

1. Попович Н.Г., Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Король С.В. Энергетически эффективные алгоритмы управления асинхронными двигателями электромеханических систем // Труды науч. – техн. конф. Проблемы автоматизированного электропривода, Алушта, 2000. – С. 25-29.

2. *Приймак Б.І.* Моделі втрат потужності у керованій асинхронній машині для задач енергозбереження // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 1 – С. 29-38.
3. *Приймак Б.І.* Аналитическое определение энергетически оптимального значения потока ротора асинхронной машины // Электричество. – 2005. – № 12 – С. 36-43.
4. *Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями/* О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов и др. -М.: Энергоатомиздат, 1983. - 256 с.
5. *Abrahamsen F., Blaabjerg F., Pedersen J.K., Thøgersen P.B.,* Efficiency-optimized control of medium-size induction motor drives // IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 37, No 6, 2001, pp. 1761 –1767.
6. *Chang J.H., Kim B.K.* Minimum-Time Minimum-Loss Speed Control of IM Under Field-Oriented Control, IEEE Trans. Ind. Elec. Vol.44, No.6, 1997, pp. 809-815.
7. *Garcia G.O., Mendes J.C., Stephan R.M. and Watanabe E.H.* An Efficient Controller for an Adjustable Speed Induction Motor Drive // IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. 41, No.5, 1994, pp. 533-539.
8. *Matsuse K., Yoshizumi T., Katsuta S. and Taniguchi S.* High-Response Flux Control of Direct-Field-Oriented Induction Motor with High Efficiency Taking Core Loss into Account, IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 35, No.1, 1999, pp.62-69.
9. *Rasmussen K.S., Thøgersen P.* Model Based Energy Optimazer for Vector Controlled IMD, Procced. of EPE' 97, Trondheim, 1997, pp. 3.711-3.716.
10. *Wasynczuk O., Sudhoff S.D., Corzine K.A. et al.* A Maximum Torque per Ampere Control Strategy for Induction Motor Drives, IEEE Trans. Ener. Convers. Vol. 13, No.2, 1998, pp. 163-169.